

Einsatz eines Biogas – Turmreaktors für die Behandlung industrieller Abwässer

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation**

**von
Matthias Krüger
aus Soltau**

2007

Vorsitzender des Prüfungsausschusses:

Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Müller

1. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Herbert Märkl

2. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Calmano

Tag der mündlichen Prüfung:

22.06.2007

Berichte aus der Biotechnologie

Matthias Krüger

**Einsatz eines Biogas-Turmreaktors
für die Behandlung industrieller Abwässer**

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6546-5

ISSN 1434-4556

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2001 bis 2006 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Bioprocess- und Bioverfahrenstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Märkl für den ungebrochenen Glauben an das Reaktorsystem. Besonders freue ich mich, dass der Abschluss der Promotion die enge Zusammenarbeit nicht beendet. Vielmehr wird das Thema Anaerobtechnik uns in gemeinsamen Projekten weiterhin beschäftigen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Calmano danke ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Müller für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Zum Gelingen meiner Dissertation haben das sehr gute und kreative Arbeitsklima innerhalb des Arbeitsbereichs beigetragen, wofür ich mich bei allen (ehemaligen) Mitarbeitern bedanken möchte.

Vor allem bei Ralf Grajetzki und Jan Sens, die trotz des häufigen Auf- und Abbaus der mobilen Pilotanlage vollen Einsatz an den Tag bzw. die Nacht legten und zur erfolgreichen Durchführung der Pilotierungen maßgeblich beigetragen haben. Thomas Gronowski und Siegrid Wiebusch erleichterten mir durch ihren fleißigen Einsatz bei der Betreuung der Laborfermenter und den Analysen die Arbeit.

Ebenso möchte ich an dieser Stelle allen nationalen wie internationalen Studierenden für Ihr Engagement danken, die im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten oder Tätigkeit als Hiwi zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben: Niels Peter Johannssen, Sten Flehmig, Prisca Chikere, Ralf Schiffel, Christoph Gimmler und Maria Xydia.

Zudem möchte ich mich bei verschiedenen Projektpartnern für die unkomplizierte und hilfsbereite Zusammenarbeit bedanken:

Herr Dr. Geipel (Rauschert Verfahrenstechnik), Dr. Jörg Taube (ehemals Rauschert Verfahrenstechnik), Herr Bohling (Industrieberatung Umwelt), Herr Kappes (ehemals Thyssen Krupp Elastomertechnik), Herr Weißer (EnviroChemie), Herr Lange (Thüringer Methylesterwerke), Herr Christiansen (Brökelmann), Herr Schmid Jr. (Naabtaler Milchwerke), Herr Dr. Frank (Rheinische BioEster), Herr Sebastian (ehemals Rheinische Bio Ester), Herr Gottschling (Nadler Feinkost).

Unerwähnt dürfen an dieser Stelle nicht Burkhard Ernst und Björn Frahm bleiben. Vielen Dank für eine unkomplizierte, ehrliche und lehrreiche Zeit als Naturwissenschaftler unter Ingenieuren. Philipp Göpel und Niels Peter Johannssen danke ich für die lebhaften Diskussionen außerhalb der Bioverfahrenstechnik beim morgendlichen Kaffee.

Meinen Eltern Hanna und Olaf Krüger möchte ich für die Möglichkeit danken, meinen eigenen Weg frei und selbständig gestalten zu können und dabei Ihren Rückhalt zu spüren.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Freundin Melanie Laaks bedanken, die es immer wieder verstand mich in Zeiten akuter Schreibblockaden zu motivieren und zu unterstützen.

Gelsenkirchen, September 2007

Matthias Krüger

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	10
1.1	Merkmale der anaeroben Abwasserbehandlung	10
1.2	Reaktortechnik der industriellen anaeroben Abwasserbehandlung	10
1.2.1	Externe Biomasserückhaltung	11
1.2.2	Interne Biomasserückhaltung	12
1.3	Grenzen der Reaktortechnik	14
1.4	Konzept des Biogas-Turmreaktors (BTR)	15
1.5	Zielsetzung dieser Arbeit	17
2	Material und Methoden	19
2.1	Bestimmung der Abwasserparameter	19
2.1.1	Chemischer Sauerstoffbedarf	19
2.1.2	Gelöst-Stickstoff (GN), Ammonium-Stickstoff (NH ₄ -N), Phosphat-Phosphor (PO ₄ -P)	20
2.1.3	Lipophile Stoffe (Summenparameter Gesamtfett)	21
2.1.4	Kurzkettige organische Säuren	23
2.1.5	Trockenrückstand (TR), Biomassekonzentration (BM)	24
2.1.6	Spurenelementanalysen	25
2.1.7	Spurenelementlösungen	25
2.2	Bilanz- und Prozessparameter	26
2.2.1	Hydraulische Verweilzeit	26
2.2.2	CSB-Raumfracht (B _{R,CSB})	27
2.2.3	CSB-Abbaugrad	27
2.2.4	Stöchiometrische Biogasproduktion	28
2.2.5	Normierte spezifische Biogasproduktion	29
2.2.6	CSB-Bilanz	30
2.2.7	CSB-Beladung und Biogasproduktion bezogen auf die Biomassekonzentration	30
2.2.8	Abscheidegrad / Biomasserückhalt	31

2.3	Versuchsreaktoren zur anaeroben Behandlung von Abwässern im Labormaßstab	32
2.3.1	Versuchsaufbau: Rührkesselreaktor mit nachgeschaltetem Abscheider	32
2.3.2	Versuchsaufbau: Airlift-Schlaufenreaktor mit nachgeschaltetem Abscheider	33
3	Technische Ausführung des Biogas-Turmreaktors.....	36
3.1	Die mobile Biogas-Turmreaktor Pilotanlage	36
3.1.1	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik.....	36
3.1.2	Gasabzugstechnik.....	41
3.1.3	Gasrezirkulation / Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit....	44
3.1.4	Verteilung der Gasproduktion	46
3.1.5	Der hydrostatisch überstaute Abscheider	49
3.1.6	Abscheider der Biogas-Turmreaktor Pilotanlage	53
3.2	Auslegung einer technischen BTR-Anlage am Beispiel eines 200 m ³ Reaktors	57
3.2.1	Abscheider einer technischen BTR-Anlage	57
3.2.2	Auslegung eines Verdichters zur Gasrezirkulation einer technischer BTR-Anlage.....	60
4	Anwendungsbeispiel: Pflanzenölproduktion	64
4.1	Abwasser der Rapsölproduktion.....	64
4.1.1	Kontinuierliche Experimente im Labormaßstab	67
4.2	Abwasser der Sonnenblumenölproduktion	72
4.2.1	Charakterisierung der untersuchten Abwasserströme	73
4.2.2	Vor-Ort Untersuchungen mit der BTR-Pilotanlage	79
5	Anwendungsbeispiel: Biodieselproduktion	85
5.1	Laborexperimente: Abbaubarkeitsuntersuchungen	85
5.1.1	Charakteristika der im Labor untersuchten Abwässer und der bei der Biodieselproduktion anfallenden Roh-Glycerole verschiedener Biodieselwerke	85

5.1.2	Kontinuierliche Experimente im Labormaßstab	88
5.2	Vor-Ort Untersuchungen durch die BTR-Pilotanlage	95
5.2.1	Rahmenbedingungen	95
5.2.2	Abwasserspezifische Parameter des glycerol-/methanolhaltigen Abwassers.....	96
5.2.3	Betriebsergebnisse und Leistungsdaten	97
5.3	Zusammenfassung der Vor-Ort Untersuchungen durch die BTR-Pilotanlage und Vergleich mit den kontinuierlichen Laborexperimenten	101
6	Anwendungsbeispiel: Molkerei	103
6.1	Rahmenbedingungen	103
6.2	Molkereiabwasser.....	105
6.2.1	Abwasserspezifische Parameter.....	105
6.2.2	Vergleich der Betriebsergebnisse: Festbettreaktor – Biogas-Turmreaktor	106
6.2.3	Zusammenfassung der Betriebsergebnisse.....	119
6.3	SüßmolkePermeatKonzentrat (SMPK).....	120
6.3.1	Abwasserspezifische Parameter des SMPK	121
6.3.2	Betriebsergebnisse	122
6.3.3	Zusammenfassung der Betriebsergebnisse.....	128
7	Zusammenfassung	130
8	Verwendete Formelzeichen und Symbole	132
9	Literaturverzeichnis.....	135